

七北田川における河口出発水位推定のための 河口砂州フラッシュ機構の数値解析

NUMERICAL SIMULATION OF SAND SPIT FLUSHING AT THE NANAKITA RIVER
MOUTH FOR ESTIMATING DOWNSTREAM END WATER LEVEL

田中 仁¹・佐藤達也²・鈴木 猛³・妹尾泰史⁴・
長沼宏一⁵・高水克哉⁴・佐藤功二⁵

Hitoshi TANAKA, Tatsuya SATO, Takeshi SUZUKI, Hiroshi SENOO,
Hirokazu NAGANUMA, Katsuya TAKAMIZU and Koji SATO

- ¹フェロー会員 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
² 宮城県土木部河川課 (〒980-8570 仙台市青葉区本町 3-8-1)
³ 工修 宮城県北部土木事務所 (〒989-6117 宮城県大崎市古川旭 4-1-1)
⁴ 工修 (株) 東京建設コンサルタント 河川計画本部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)
⁵ (株) 東京建設コンサルタント 河川計画本部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)

At the mouth of Nanakita River, elongated sand spit can be frequently observed due to predominance of wave motion, and is occasionally flushed during big floods. For a river planning with the presence of elongated sand spit, the unsteady flushing process of sediment at the river entrance should be considered, instead of a simple assumption of constant water level at the downstream end as has been usually employed up to now. The present paper describes influence of flood hydrograph on the time variation of river stage and corresponding development of bed topography under the actions of both tide and high flood flows at the mouth of Nanakita River during a design flood. The water level thus obtained is utilized as downstream end water level for the river planning.

Key Words : River mouth, sand spit, river mouth closure, numerical simulation, river planning, Nanakita River, wave set-up

1. はじめに

河口部に砂州が発達している河川では、洪水時にこの砂州がどのような挙動を示すかによって河川の流下能力評価にも影響が生じ、河道計画上の課題とされている。本研究において対象としている七北田川もそのような課題を抱えた河川の一つである。現行の河道計画・流下能力の算定における出発水位の設定は、①維持可能な砂州高を勘案して砂州高+0.5mを設定する、②朔望平均満潮位に海水の密度差に起因する水位上昇量を上乘せして設定する、③痕跡水位の最高値を与える、④河床変動計算による河口部ピーク水位を設定するという、四つの考え方が¹⁾ある。①及び②の手法は砂州地点の河床変動が顕著ではない場合に適用される。洪水時に河口部の地形が大きく変化することが確認されている七北田川においては不向きである。また、③及び④は河口における河床変動が顕著な場合に適用される。③の手法による場合、一般に、河口部における痕跡の測定法、及び河口地点における痕跡の記録自体がないた

め近傍の港湾潮位を用いざるを得ない事など、課題も多い。本研究の対象である七北田川においても、河口における洪水時痕跡水位は測定されていない。河口砂州の発達が発著かつ変動が大きいと考えられる河川においては④の手法が有効であると考えられる。

山内ら²⁾は、七北田川河口砂州の変動特性と砂州フラッシュ機構を分析し、これを踏まえて砂州フラッシュ予測計算手法を開発した。そこでは、洪水時には河口砂州がフラッシュされ、河口前面に大規模な河口テラスが形成されることを示し、河道計画との関連を議論する前段階として、現象の再現を行った。

本稿は、河口砂州の発達した七北田川において、山内らの計算手法を適用し、④の観点で設定した河道計画出発水位の実用性を検討することを目的とした。

2. 対象領域

七北田川は宮城県仙台市北部を流れる二級河川で、幹線流路延長は45km、流域面積は229.1km²、また、

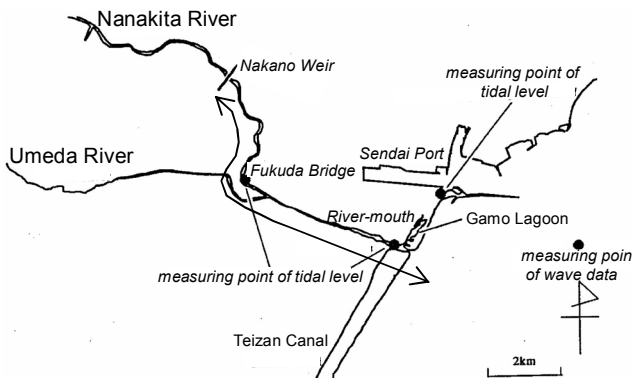


図-1 七北田川流域概要図

計画高水流量は $1,650\text{m}^3/\text{s}$ に設定されている。対象地域となる七北田川周辺を図-1 に示す。河口から約 4km 上流に支川梅田川が合流する。河口から 200m ほど上流の左岸側には蒲生干潟が、河口から 500m ほど上流の右岸側には南貞山運河がある。この南貞山運河は北上川から宮城県中央を流れる名取川河口、さらには阿武隈川河口まで通じている貞山運河の一部である。また、河口から北方約 2km のところに仙台港が位置している。

七北田川では、河口閉塞が著しく、過去少なくとも 6 回の完全閉塞が確認されているが、平成 6 年に完全閉塞して以降は、河道掘削・浚渫の効果により感潮面積が増加し、完全閉塞は確認されていない。また、図-2 に示すように、現在の右岸砂州発達地形は安定している事が、既往報告³⁾により確認されており、完全閉塞は生じ難くなっていると考えられているが、依然として河口は砂州により非常に狭くなっている。

3. 解析手法

本解析モデルは、図-1 の領域を対象に河口部(沖合～河道 0.6km)における地形変動を解析する二次元モデル領域と、入退潮に伴う流れや洪水の流下を扱えるようにするための一次元領域(0.6km～上流)を接続したモデルである。本解析モデルの再現性は、山内らが、1996 年 9 月の台風に伴う出水を対象に検討を行っている⁴⁾。この結果、地形変化については、計算と実測の類似性を認め、河道水位については良好な再現精度であることを確認している。

(1) 一次元領域

洪水期間を再現するには洪水の立ち上がる数十時間前から計算を始め、流れの初期条件の影響が再現期間に及ばないようにしなければならない。そこで、河川の逆流時などの計算が可能となるよう感潮区間全域に計算領域を設定し、上流側は一次元モデルで計算を行った。

基礎式については、一般に用いられている一次元不定流の運動式及び連続式を用いた。

(2) 二次元領域

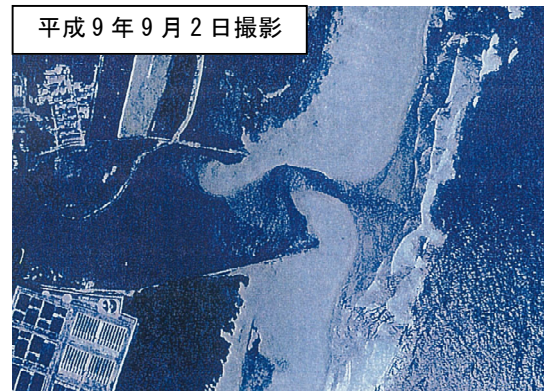


図-2 河口砂州の状況

a) 流況解析

水平拡散項を考慮しない平面二次元の浅水方程式を leap-frog 法で解いた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (1a)$$

ここに、 $D(=h+\eta)$: 全水深、 h : 静水深、 η : 静水深からの水位、 ρ : 水の密度、 M, N : x, y 方向の線流量である。

底面摩擦力は一次元計算と同様に Manning 則を用いて表現した。

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2a)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2b)$$

b) 地形変動解析

河口砂州の代表粒径は 0.35mm であり、洪水時には浮遊形態の流砂も存在するが、 u_c/ω_s はピーク時において 5 程度である。また、掃流砂のみでも、フラッシュに伴う河川水位の挙動特性を概ね再現可能²⁾なことから、ここでは掃流砂を対象とした。

流砂量式には Meyer-Peter-Muller 式 (MPM 式) を用いた。

$$q_B^* = 8(\tau^* - \tau_{cr}^*)^5 \quad (3)$$

ここに、 q_B^* : 無次元掃流砂量、 τ^* : 無次元掃流力、 τ_{cr}^* : 無次元限界掃流力である。また、無次元限界掃流力は、岩垣の式より算定した。

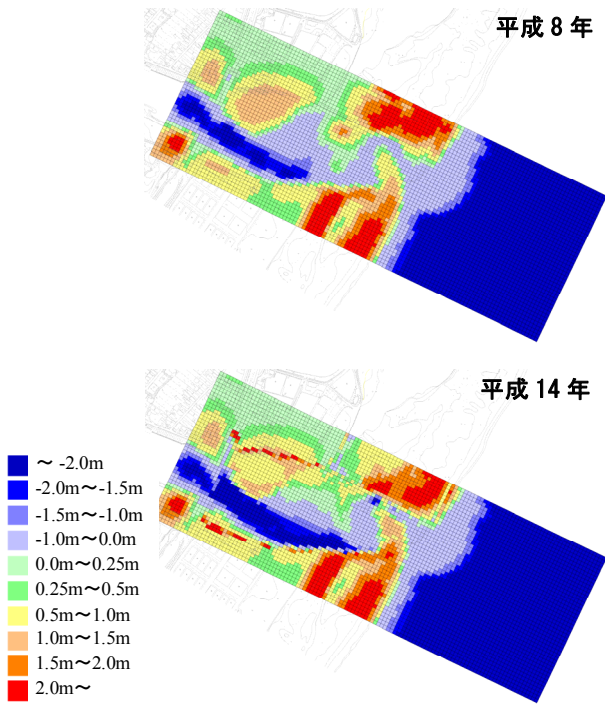


図-3 河口地形メッシュ標高データ

掃流砂量式は本来、緩勾配等流に対して提案されているため、砂重量の流れ方向成分を以下の式で考慮する。

$$q_{BI}^* = q_B^* / C_I \quad (4)$$

ここに、 q_{BI}^* ：斜面における無次元掃流砂量、 C_I は

$$C_I = \cos \theta \left(1 - \frac{\sigma \tan \theta}{\sigma - \rho \mu_s} \right) \quad (5)$$

で与えられる限界掃流力の斜面修正係数であり、 θ ：斜面勾配、 σ ：砂の密度、 μ_s ：砂の静止摩擦係数である。

以上により、各メッシュでの掃流砂量を求め、次の流砂の連続式に代入して時々刻々と地盤高の変位を求める。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

ここに、 z ：地盤高さ、 λ ：砂の空隙率である。

4. 解析条件

(1) 地形条件

七北田川では、二カ年（平成8年及び14年）における河口部深浅測量結果が得られている。両者を図-3に示す。かつては閉塞を繰り返しており、平成8年の地形は、その影響が残っている。砂州高自体は平成14年の方が高いが、流路部分を見ると、平成14年の方が水深が大きくなっている。これは、近年の河道掘削・浚渫を行ったため、入退潮量が増し、流路が維持されている為であると考えられる。

(2) 流量条件

解析に用いる流量ハイドロは図-4に示すように、

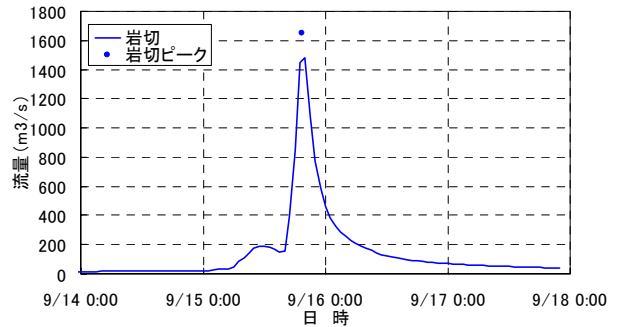
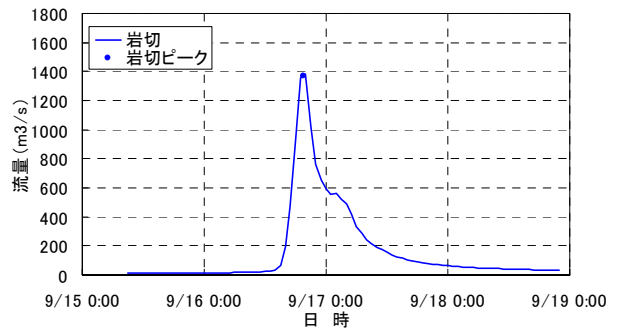


図-4 流量ハイドロ条件

上：現況施設 S23.9 (1,500m³/s) 既往最大洪水

下：基本方針対象洪水 S22.9 引き延ばし (1,650m³/s)

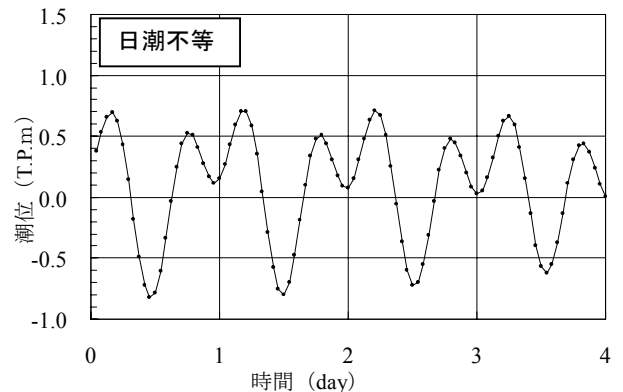


図-5 解析に用いた潮位パターン

既往最大洪水(当面の整備目標)である S23.9 洪水を対象に、H21 年現況における洪水調節施設を考慮した洪水波形(福室地点:1,500m³/s)及び基本方針対象流量である S22.9 洪水を引き延ばしたハイドログラフ(福室地点:1,650m³/s)とした。

(3) 潮位条件

潮位条件としては、図-5に示すような、日潮不等パターンを用いた。日潮不等パターンは潮位の高い時間が継続するため、砂州のフラッシュに不利な条件となる。また、ピーク潮位を仙台港における朔望平均満潮位である TP+0.705m にスライドし、洪水流量ピーク時刻と合わせた。

(4) wave set-up

砕波により平均水位が上昇する wave set-up を考慮した。七北田川河口において wave set-up は以下の

表-1 その他計算条件

	一次元領域	二次元領域
空間格子間隔	$\Delta x=100\text{m}$	$\Delta x=\Delta y=10\text{m}$
時間格子間隔	0.2s	0.2s
底面せん断力	Manning 則より	Manning 則より
Manning の粗度係数	0.03	アシ原 0.135 その他 0.03
粒径	—	0.35mm
砂の空隙率	—	0.4
砂の静止摩擦係数	—	0.78
砂の水巾比重	—	1.65

表-2 計算ケースとピーク水位算定結果

No	ハイドロ波形 (ピーク流量 m^3/s)	河口部 初期 地形	下流河道 (0.6k まで)	ピーク 水位 (T.P.m)
				0.5k 地点
①	S23.9(1500)	H8	現況	3.051
②	S23.9(1500)	H14	現況	2.821
③	S22.9(1650)	H8	現況	3.136
④	S22.9(1650)	H14	現況	2.901

※黄色は 0.5k における H.W.L. (=3.04m) を超過したケースである。

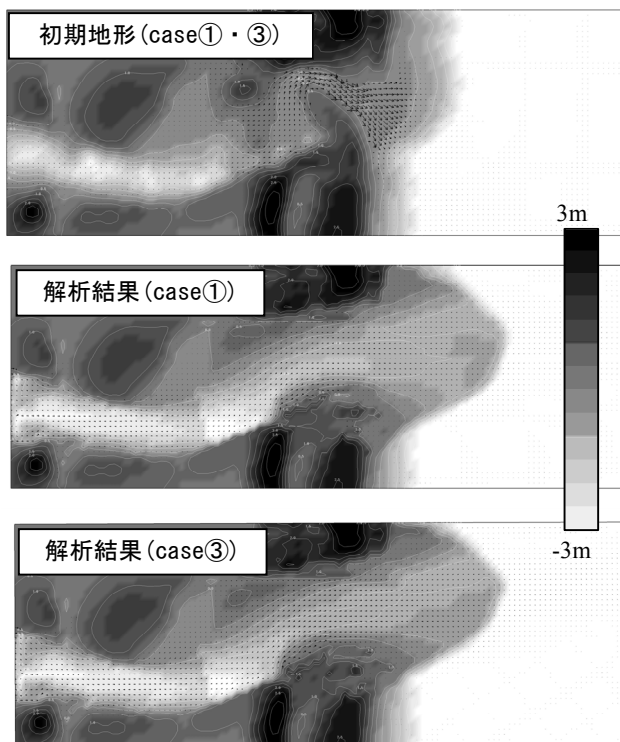


図-6 流量条件による河口の地形変化の違い

ように表現される⁵⁾。

$$\frac{\text{WaveSet-up}}{(\text{沖波波高})} = -0.022 \times (\text{河口平均水深}) + 0.15 \quad (7)$$

ここに、河口水深の単位は m である。また、沖波波高は仙台新港沖での月平均波高のうち 1991 年から 1997 年までの最大値 1.39m を用いた。

(5) その他の条件

七北田川の河口内には蒲生干潟が存在し、洪水時には洪水流が流入することが確認されている。本研究においては、蒲生干潟の水深と容量の関係を一次的に表現し、通水管を介した流入-流出量算定には等流式を用い、越流分についてはもぐり越流の式で算定した。

また、計算のメッシュ間隔、計算時間間隔等は表-1 に示す通りとした。

5. 解析結果

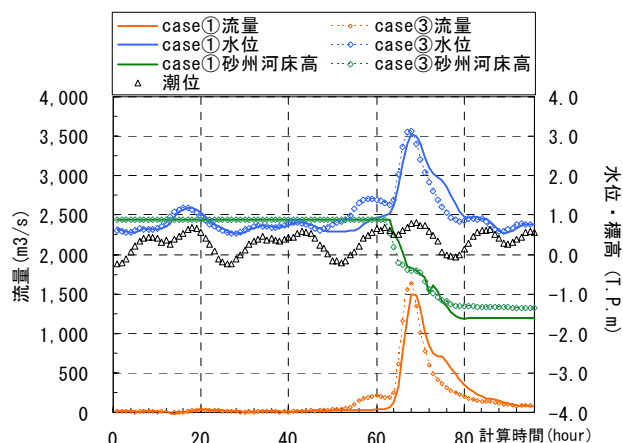


図-7 河口部における水位等
(流量ハイドロによる比較 case①と③の比較)

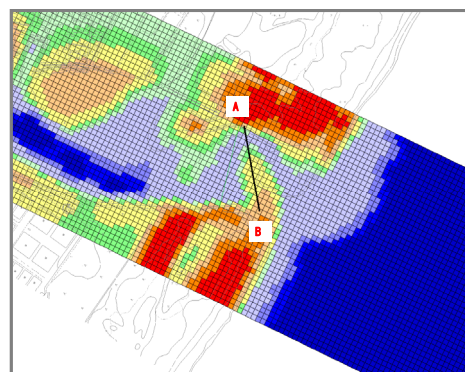


図-8 図-9 及び図-12 における横断測定線

前述の条件より、表-2 に計算ケースを示す。

(1) 流量条件によるフラッシュ機構の変化

図-6 に流量条件の違いによる平面形状の変化を、図-7 に河口内水位(0.5k 地点)・潮位・流量・河床高(砂州上の一点)の時系列変化を示す。

平面形状については、大きな差異は見られないが、若干ピーク流量の小さい case①の方が、砂州が低下している。河口内ピーク水位については、case①(1,500 m^3/s)で 3.051m、case③(1,650 m^3/s)で 3.136m となっており、若干ではあるが case③の方が高くなっている。合わせて、図-9 に河口砂州部における横断形状の時系列変化を示す。流量ピーク時までの河床低下量はほぼ同等か case③の方が若干大きくなっ

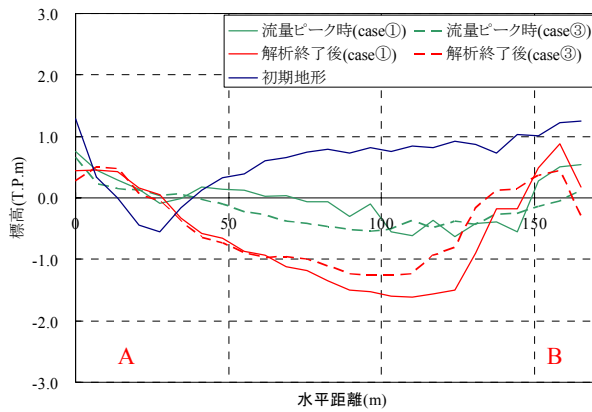


図-9 砂州横断形状の変化
(case①と case③の比較)

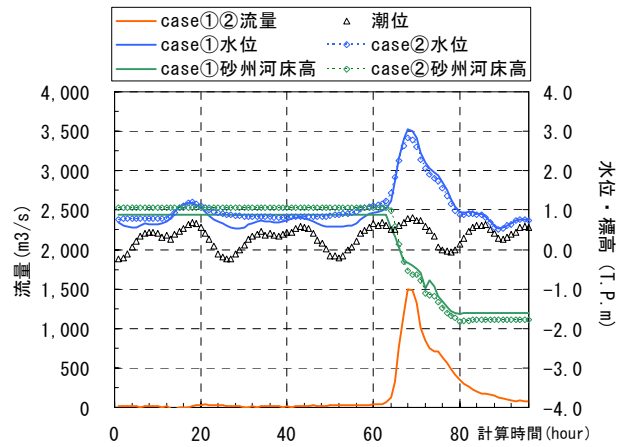


図-11 河口部における水位等
(初期地形条件による比較 case①と②の比較)

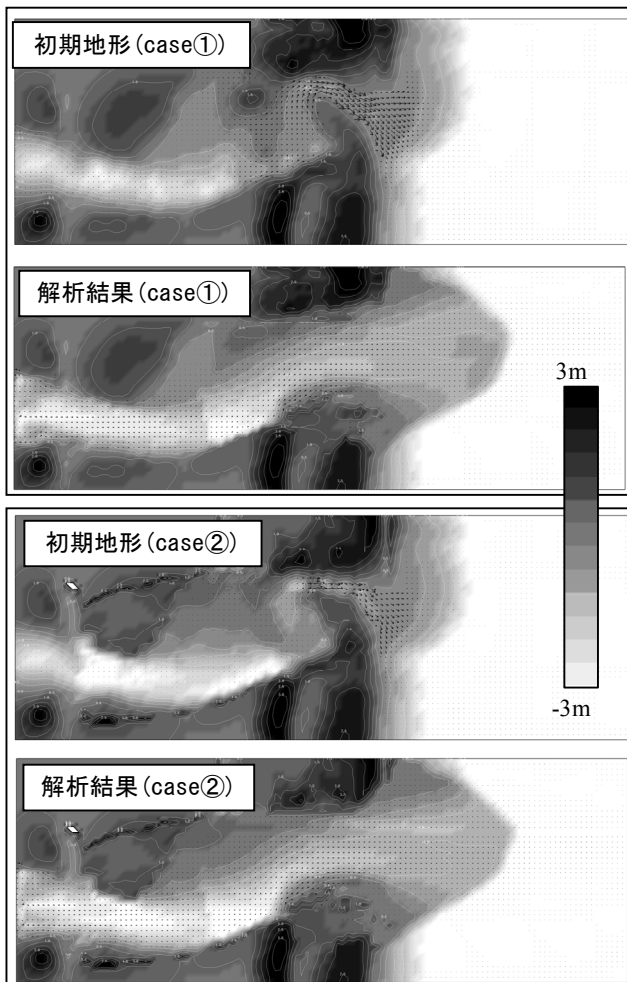


図-10 地形条件による河口の地形変化の違い
(case①と case②の比較)

ており、逆に最終的な河床低下量は case①が大きくなっている。平面図上では case①の方が河床低下が大きくなっていたが、実際には流量ピークを過ぎた後の現象であることがわかる。つまり、最終的な砂州部の河床低下量は、洪水後期に $600\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量が継続している事に起因すると考えられる。また、このような現象は洪水ピークを超えてから発現する

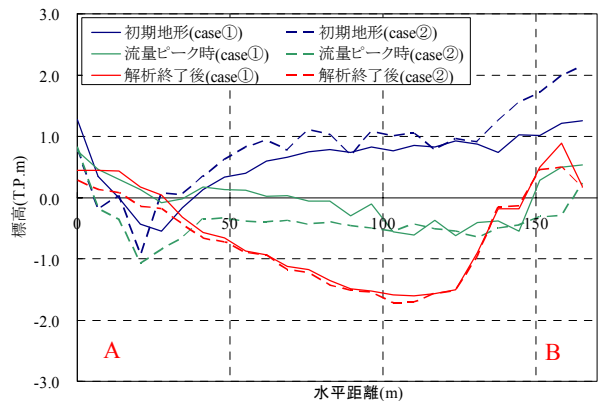


図-12 砂州横断形状の時間的変化
(case①と case②の比較)

ため、ピーク水位低下には寄与していないものと思われる。

(2) 初期地形条件によるフラッシュ機構の変化

図-10 に流量条件の違いによる平面形状の変化を、図-11 に河口内水位(0.5k地点)・潮位・流量・河床高(砂州上の一点)の時系列変化を示す。

図-10 より初期地形条件の違いによる最終的な地形形成に大きな相違はない。前述の流量条件の方が、微々たる差ではあるが、河床の掘れ方に効いていると思われる。

図-11 より、計算開始後の平常時において、平成 14 年測量地形の場合の方が、水位が高くなっている。これは、平成 14 年地形の方が、砂州河床高が上昇しているためである。

また、図-12 より、平成 8 年地形より平成 14 年地形の方が通水幅は狭いが、深くなっている。これは近年の河道掘削・浚渫の効果であると推測される。そのため、平成 14 年地形では、洪水初期に河口砂州近傍において水面勾配がより大きくなるとともに、流水が集中するため、フラッシュによる河床低下が大きく、ピーク水位も大きく低下したものと考えられる。

6. 河道計画への反映と課題

(1) 洪水ピーク時の現象と水位の関係

七北田川の河道計画では、「河川整備基本方針流量(1,650m³/s)」と「当面の整備目標流量(1,500m³/s)」における河床変動を考慮した、洪水ピーク時の河口水位が重要となる。そこで、これについて整理を行うと以下の通りである。

- ・ピーク流量が大きい河川整備基本方針流量の方がフラッシュによる河床低下量が大きい。
- ・ピーク時の河床低下量が大きくとも、ピーク流量が大きい河川整備基本方針流量の方が河道下流端(河口ではなく計画上の出発位置)での水位は高い。
- ・河床低下量が洪水による水位上昇量より大きいと、相対的に流量の増加に伴って河口水位が低下することも考えられるが、七北田川において、そのような関係は生じないことを確認した。

(2) 七北田川河道計画出発水位への適用

七北田川では河道改修を進め、平成 8 年以降の改修の進捗により、河道の入退潮量が増大し、河口維持の条件も変化している。そのため、河道計画では、地形データが得られている平成 8 年と平成 14 年のうち、平成 14 年度地形を初期地形とした。

a) 砂州フラッシュを勘案した出発水位設定

河道計画では、砂州フラッシュ計算より得られた 0.5km 地点のピーク水位を出発水位に適用した。これは、左岸にある蒲生干潟の影響を砂州フラッシュ計算の中で考慮することで、その影響が既に 0.5km 地点の水位に反映されているものとし、河道計画検討からは除外することなどを狙ったためである。

b) 既往計画との整合性

既往計画では、出発水位として 0.5k 地点に HWL である T.P.3.04 を設定したが、本検討の結果もこれに近い水位を与える結果となり、現行 HWL の妥当性を洪水時の河口砂州フラッシュ現象を考慮することで説明することができる。

(3) 今後の課題

a) 初期地形の影響とモニタリングの必要性

地形データが平成 8 年と平成 14 年の二年に限られており、ピーク水位は平成 8 年の地形の方が平成 14 年地形より 20cm 程度高い結果となっている。したがって河道計画に適用する河口砂州の初期値地形設定の考え方が課題となる。初期地形条件として平均的ピーク水位を与える地形、尤もピーク水位が高くなるような地形、頻度的に尤も出現しやすい砂州地形等、初期地形設定の考え方を今後整理することが必要となる。このことから、七北田川でも、今後も監視を継続し河口砂州地形の測量やリモートセ

ンシングによるモニタリングを計画している。

b) 砂州フラッシュの考慮と自然環境保全

本解析モデルは、砂州フラッシュによる自然の河口地形変化を適切に考慮できる。そのため、ヨシ原など貴重な自然の残る河口部の改修による地形変化を最小限にとどめるような計画策定にも貢献しうる。

7. 結論

二級河川七北田川の河道計画において、河口砂州フラッシュ計算を行うことにより、洪水時の砂州の挙動を考慮した河口出発水位を設定することの実用性について検討した。以下に主要な結論を示す。

- (1) データが得られている平成 8 年、平成 14 年の河口閉塞状況であれば、計画高水規模の洪水時にフラッシュされることが示された。
- (2) 流量による感度分析を実施した結果、ピーク流量が大きい程、河床低下も大きくなるが、河口内水位が逆転することはなかった。河道計画の出発水位は、当面の整備目標(流量:1,500m³/s)の場合は出発水位は河川整備基本方針(流量:1,650m³/s)の場合に比べ 0.5km 地点において約 8cm 低くなり、計画の安全度の差を反映した出発水位を設定することができた。
- (3) 計画規模洪水時の河口砂州フラッシュ計算により得られた 0.5km 地点のピーク水位は、既往計画における当該地点の HWL と概ね一致し、現行 HWL の妥当性を洪水時の河口砂州フラッシュ現象を考慮することで説明することができた。
- (4) 河口部に蒲生干潟と河口砂州を有する七北田川の河道計画において、干潟を考慮した河口砂州フラッシュ計算を行うことにより、実用的な河口出発水位を設定することができた。

参考文献

- 1) 財団法人国土技術研究センター編: 河道計画検討の手引き, 山海堂, 189p, 2002.
- 2) 山内健二, 田中 仁: 中小河川特有の河口現象を考慮した地形変化予測モデル, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp451-455, 1998.
- 3) 田中 仁, 山本秀和: 河道掘削による感潮面積増加がもたらした河口水位変動特性・低生物相の変化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.1136-1140, 2000.
- 4) 山内健二, 田中 仁: 河口水位に及ぼす河口砂州の効果, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp441-445, 1997.
- 5) Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 長林久夫: 2006 年秋冬冬季低気圧来襲時に観測された河口感潮域 wave set-up 高さ, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.321-325, 2007.

(2010. 9. 30 受付)